

## 激光与光电子学进展

## 大相对孔径激光测距接收光学系统及杂散光抑制

周星宇<sup>1,2,3,4</sup>, 孙亮<sup>1,2,3,4</sup>, 潘俏<sup>1,2,3,4</sup>, 吴绍龙<sup>1,2,3,4</sup>, 曹国洋<sup>1,2,3,4\*</sup>, 李孝峰<sup>1,2,3,4\*\*</sup><sup>1</sup>苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;<sup>2</sup>苏州大学苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215006;<sup>3</sup>苏州大学教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;<sup>4</sup>苏州大学江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

**摘要** 为解决目前激光测距接收光学系统存在的难点,即系统在具有充足进光量的同时又要保证其低制造成本和轻小型化,基于拉格朗日不变量理论分析设计了一种大相对孔径接收光学系统。系统采用 6 片式伽利略型标准球面镜,使用光敏面直径为 0.5 mm 的雪崩光电二极管 (APD) 探测回波光信号,优化后的系统入瞳直径为 50 mm,相对孔径为 1:0.9,系统总长为 114.9 mm,拉格朗日不变量为 125 mrad·mm,获得了较为充足的进光量的同时满足低成本小型化要求。为降低杂散光的影响,进一步设计了遮光罩及镜筒栅栏结构。杂散光模拟追迹结果表明,系统在 20°~85° 离轴角视场外的杂散光抑制可以达到激光测距系统要求。在接收光学系统拉格朗日不变量为 125 mrad·mm 的前提下,激光测距系统的测距量程在加入光学系统后综合提升了 21 倍,表明该接收光学系统具有较大应用价值。

**关键词** 激光测距; 光学设计; 拉格朗日不变量; 大相对孔径; 杂散光分析

中图分类号 TN202

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230451

## Large Relative Aperture Receiving Optical System and Stray Light Suppression for Laser Ranging

Zhou Xingyu<sup>1,2,3,4</sup>, Sun Liang<sup>1,2,3,4</sup>, Pan Qiao<sup>1,2,3,4</sup>, Wu Shaolong<sup>1,2,3,4</sup>, Cao Guoyang<sup>1,2,3,4\*</sup>, Li Xiaofeng<sup>1,2,3,4\*\*</sup><sup>1</sup>School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China;<sup>2</sup>Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;<sup>3</sup>Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Soochow University, Suzhou 215006, China;<sup>4</sup>Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou 215006, China

**Abstract** To solve existing difficulties in the current laser ranging receiving optical system, that is, the system has sufficient light input while ensuring its low manufacturing cost and light miniaturization, a large relative aperture receiving optical system is analyzed and designed based on the Lagrange invariant theory. The proposed system uses a six-piece Galilean standard spherical mirror, and an avalanche photodiode (APD) with a photosensitive surface diameter of 0.5 mm, to detect an echo light signal. The optimized system consists of an entrance pupil diameter of 50 mm, a relative aperture of 1:0.9, a total system length of 114.9 mm, and a Lagrange invariant of 125 mrad·mm, which not only obtains sufficient light input, but also addresses low-cost miniaturization requirements. To reduce the stray light influence, the lens hood and barrel fence structure are further designed. Stray light simulation tracking results indicate that the stray light suppression outside the 20°–85° off axis angle field of view meets the laser ranging system requirements. Under the premise of receiving an optical system with a Lagrange invariant of 125 mrad·mm, the ranging range comprehensively increased by 21 times after adding the optical system. This confirms that the receiving optical system has significant application value.

**Key words** laser ranging; optical design; Lagrange invariant; large relative aperture; stray light analysis

## 1 引言

20 世纪 60 年代,激光器的问世给世界带来巨大影

响,不久后便诞生了第一套激光测距系统。随着时间的推移,激光测距技术被广泛应用于军事、民用等领域,衍生出各种实用产品,如激光云高仪、小型测距机

收稿日期: 2023-01-05; 修回日期: 2023-02-28; 录用日期: 2023-03-22; 网络首发日期: 2023-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(62120106001,62105126,61875143)、江苏省自然科学基金(BK20210454)

通信作者: \*gycao@suda.edu.cn; \*\*xfli@suda.edu.cn

等。目前激光测距方法众多,包括脉冲法、相位法、三角法和干涉法等<sup>[1-2]</sup>。其中,脉冲式测距因其远测程、低成本等优势,被广泛应用于中远距离测量<sup>[1]</sup>。中远距离激光测距的关键技术之一在于对非合作目标漫反射微弱信号的高效接收,因此测距系统通常需配备高性能的接收光学系统从而将更多的回波光信号聚焦于探测面。

目前已有较多关于激光测距接收光学系统的报道<sup>[3-8]</sup>,表 1 中列举了几种典型系统的指标参数,表中 T 表示透射式系统, R 表示反射式系统。表中的拉格朗日不变量<sup>[9]</sup>是评价光学系统进光量的指标之一,它联系着光学系统的入瞳直径、相对孔径、视场等参量,也是评估光学系统设计难度的重要标准。从表 1 不难看出,激光测距领域中的接收光学系统主要特点是具有较大的相对孔径,其量级大部分在 1:2。由于探测器光敏面直径较小(一般在 0.5 mm 及以下),系统视场偏小,系统全视场一般不超过 10 mrad,且为控制系统加工

制造成本,绝大部分设计均采用透射式系统。从表 1 也可看出,在早期的测距仪与测距望远镜等应用<sup>[3-6]</sup>中,为实现系统小型化,接收系统入瞳直径保持在 20~40 mm,机械总长则由测距系统金工长度决定,普遍在 150 mm 以下。但入瞳直径与视场角被限制得过小,系统拉格朗日不变量的值均在 100 mrad·mm 以下,其值量级偏小,进而导致系统进光量并不充分,以至于激光测距系统的测距量程受到了局限。在近年的研究中,季云飞等<sup>[7]</sup>以及潘俊旭等<sup>[8]</sup>分别设计了口径为 92 mm 与 120 mm 的激光测距接收光学系统,这两个接收光学系统适合远程的激光测距,但它们为保证较小的弥散斑尺寸(5  $\mu\text{m}$  及以下)而牺牲了一定的视场,使得它们的系统拉格朗日不变量的值偏低,且为保证系统的轻小型化分别使用了二次曲面反射镜和非球面镜,增加了制造装配成本。因此,如何在保证系统充足进光量的同时使其制造成本较低、轻小型化等成为了目前激光测距接收光学系统领域的研究热点和难点之一。

表 1 近年来激光测距接收光学系统研究进展

Table 1 Recent advances in receiving optical systems for laser ranging

Parameter	Value					
	T	T	T	T	R	T
Optical type	T	T	T	T	R	T
Number of lenses	3	3	4	5	7	4
Diameter of entrance pupil $D$ /mm	38	32	22	35	92	120
Field $2\omega$ /mrad	10	5	6	7	4	1
Lagrange invariant $J$ / (mrad·mm)	95	40	33	61.25	92	30
Relative aperture	1:1.4	1:2.2	1:3.8	1:1.8	1:1.7	1:0.6
Total length $L$ /mm	76.7	86.6	94.1	143.5	170	108
Focus spot size $\Phi_0$ /mm	0.3	0.019	0.006	0.005	0.005	0.001
Diameter of detecting surface $\Phi$ /mm	0.5		0.5	0.5		0.075
Reference	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]

针对激光测距接收光学系统的高性能和低成本这一要求,本文以工作波长为 905 nm 的脉冲激光器和相应的雪崩光电二极管(APD)分别作为发射端和接收端,实现中远距离 100 m 的单点测距,为使最终研制的测距仪轻小便携,要求接收光学系统口径不得超过 50 mm,机械总长小于 120 mm,在接收端 APD 光敏面尺寸(直径 0.5 mm)确定情况下为充分保证中远距离回波信号的进光量其视场角规定为 10 mrad。从非成像系统的拉格朗日不变量理论出发,设计研制了一种大相对孔径激光测距接收光学系统,并在外场进行了实验。系统采用 6 片标准球面透镜,入瞳直径为 50 mm,相对孔径为 1:0.9,总长为 114.9 mm,拉格朗日不变量为 125 mrad·mm,参考表 1 可知,其拉格朗日不变量数值相对较大,保证了系统充足的中远距离回波信号进光量。为抑制外场应用时的杂散光影响,在有限尺寸和体积内还设计了外遮光罩与镜筒内栅栏组合的挡光结构,有效降低了杂散影响,提高了回波信号的纯度。整体系统在实现较强的中远距离回波信号接收的同时实现了轻小型化,光学系统

结构紧凑、聚焦光斑小,且使用的标准球面透镜可有效控制系统加工成本,具有较大的应用价值。

## 2 光学系统理论分析及指标

### 2.1 拉格朗日不变量与系统进光量

所设计激光测距接收光学系统使用单个 APD 作为探测器,属于非成像系统<sup>[8]</sup>,进光量是接收光学系统的重要参数之一。拉格朗日不变量与系统进光量有着紧密联系<sup>[9]</sup>,它通常由物像关系推导出,而对于非成像类的系统,可以从光能传递的角度,根据能量守恒定律由入射和出射光学系统的光通量推导出激光测距接收光学系统的拉格朗日不变量等式。

图 1 中  $y, y'$  分别为物高和像高,  $u, u'$  分别为物方和像方孔径角,  $n, n'$  分别为物方和像方折射率,  $\omega, \omega'$  分别为物方和像方视场角,  $D, D'$  分别为入瞳和出瞳直径,  $l$  为物距。

若激光测距目标物即物方的光亮度为  $L$ , APD 光敏面即像方的光亮度为  $L'$ , 如果不考虑光束传播过程

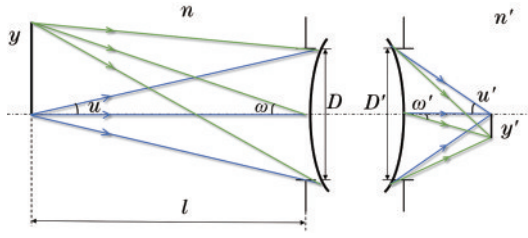


图 1 激光测距接收光学系统的光路示意图

Fig. 1 Light trace of receiving optical system for laser ranging

中的能量损失,那么位于同一光线上的所有各点在该光线传播方向上的光亮度  $L_0$  不变<sup>[10]</sup>,即

$$\frac{L}{n^2} = \frac{L'}{n'^2} = L_0 \quad (1)$$

进入光学系统的光通量  $\Phi$ <sup>[10]</sup>为

$$\Phi = \pi L y^2 \sin^2 u, \quad (2)$$

经过光学系统折射传输后,出射光学系统的光通量  $\Phi'$ 为

$$\Phi' = \pi L' y'^2 \sin^2 u', \quad (3)$$

若不考虑进入光学系统后的光能损失,则有  $\Phi = \Phi'$ ,可得:

$$\pi L y^2 \sin^2 u = \pi L' y'^2 \sin^2 u'. \quad (4)$$

将式(1)代入(4)式,有  $n^2 y^2 \sin^2 u = n'^2 y'^2 \sin^2 u'$ ,简化即可得到激光测距接收光学系统拉格朗日不变量  $J$ 的等式:

$$J = n y \sin u = n' y' \sin u'. \quad (5)$$

对于激光测距系统来说,其目标物的距离即物距  $l$  相对于系统入瞳直径  $D$  大很多,即  $l \gg \frac{D}{2}$ ,因而  $\sin u \approx u$ ,再根据前文综述接收光学系统具有小视场角的特点,则有  $\tan \omega \approx \omega$ . 根据图 1 几何关系,由式(5)进一步推导,有

$$J = n y \sin u \approx n \cdot l \omega \cdot u = \frac{n D \omega}{2}. \quad (6)$$

由式(6)可知,拉格朗日不变量  $J$  的大小和接收光学系统入瞳直径  $D$  与视场  $\omega$  的乘积有着直接联系,即根据已知量可计算出激光测距接收光学系统的拉格朗日不变量  $J$ . 最后由式(2)进一步推导可得到进入光学系统的光通量  $\Phi$  和系统拉格朗日不变量  $J$  之间的关系式:

$$\Phi = \frac{\pi L}{n^2} \cdot J^2. \quad (7)$$

可见当测距目标物光亮度  $L$  保持不变即待测物面保持稳定不动时,进入接收光学系统光通量  $\Phi$  与系统拉格朗日不变量  $J$  呈正相关. 因此,拉格朗日不变量  $J$  的数值大小可为激光测距接收光学系统的进光量提供重要参考,即系统拉格朗日不变量  $J$  越大,系统进光量越大.

## 2.2 接收光学系统选型

激光测距接收光学系统主要有透射式和反射式两类:透射式主要分为开普勒型和伽利略型结构<sup>[6]</sup>;反射式主要分为牛顿型、卡塞格林型和格里高利型结构. 透射式系统的两类结构如图 2 所示,相同入瞳直径下,

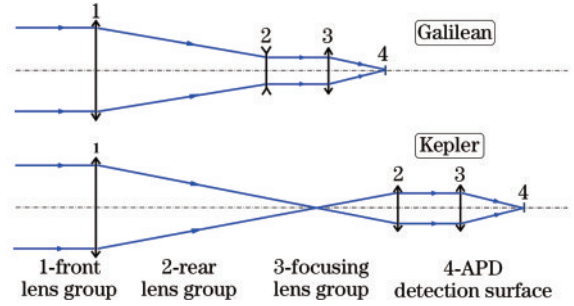


图 2 伽利略型和开普勒型接收光学系统

Fig. 2 Galileo and Kepler type receiving optical systems

伽利略型结构相较于开普勒型更有利于激光测距系统小型化,再加上激光测距接收光学系统需满足低制造成本的指标且对成像质量要求不高,因此所提接收光学系统采用伽利略型结构作为光学设计基础结构.

## 2.3 接收光学系统设计指标

使用光敏面直径  $D_d$  为 0.5 mm 的 APD 作为接收端探测器. 接收光学系统焦距  $f_{\text{total}}'$ 、APD 光敏面直径  $D_d$  和接收半视场角  $\omega$  之间关系如下:

$$f_{\text{total}}' \leq \frac{D_d}{2 \tan \omega}. \quad (8)$$

由式(8)可知三者之间相互制约影响,由前述拉格朗日不变量分析可知较大的视场  $\omega$  可以增加系统中远距离回波能量的接收,但会导致系统总焦距偏小,使得系统相对孔径偏大. 因此根据已知的 APD 光敏面直径  $D_d$  提出以下光学设计指标,具体参数如表 2 所示. 根据激光测距接收光学系统小视场的特点权衡后规定系统视场角为 10 mrad (0.57°),同时为达到激光测距系统轻量化指标要求,其系统入瞳直径不大于 50 mm,光学系统总长小于 120 mm.

表 2 激光测距接收光学系统设计指标

Table 2 Design target of receiving optical system for laser ranging

Parameter	Value
Operating wavelength /nm	905
Focal length /mm	<50.3
Diameter of entrance pupil /mm	50
Field of view /mrad	10
Diameter of APD detecting surface /mm	0.5
Total length /mm	<120
Rear working distance /mm	>0.8

## 3 接收光学系统设计

### 3.1 接收光学系统初始结构

接收光学系统为伽利略型结构,主要分为两部分:伽利略望远系统和聚焦系统. 伽利略望远系统的放大倍数为 5 倍,一定的放大倍数可使后端聚焦系统具有较小的尺寸及质量,从而使光学系统轻量化. 伽利略



望远系统包含前镜组和后镜组,每个镜组可等效为单透镜,根据透镜制造公式<sup>[10]</sup>,有

$$\frac{1}{f'} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2 d}{nr_1 r_2}, \quad (9)$$

式中: $f'$ 为透镜焦距; $n$ 为透镜折射率; $r_1$ 为透镜前表面曲率半径; $r_2$ 为透镜后表面曲率半径; $d$ 为透镜中心厚度。

由式(9)可根据分配的各等效透镜即镜组所持光焦度计算出其曲率半径,考虑前镜组具有较大的通光口径,故使用双胶合透镜组成前镜组,单透镜为后镜组以保证整体系统光学透过率。由于接收光学系统具有大相对孔径和小视场的特点,因此聚焦系统选择三分离式望远物镜,再与伽利略望远系统组合即可构成接收光学系统初始结构,初始结构由 6 块透镜组成,共 11 个光学表面,如图 3 所示。系统初始性能参数如表 3 所示。

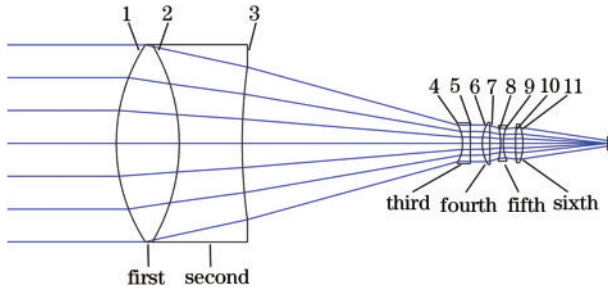


图 3 激光测距接收光学系统初始结构

Fig. 3 Initial structure of the receiving optical system for laser ranging

表 3 激光测距接收光学系统初始性能参数

Table 3 Initial performance of laser ranging receiving optical system

Root mean square spot radius / $\mu\text{m}$	Enclosed energy radius in 100% / $\mu\text{m}$
400	900

### 3.2 接收光学系统优化

APD 光敏面半径为  $250\ \mu\text{m}$ ,而表 3 中的初始系统的性能显然不能满足系统指标,因此需要对其进行优化。优化过程中,所有透镜面型均使用标准球面以保证较低的制造成本,并且改变聚焦系统的玻璃材质,使其与伽利略望远系统保持一致,优化过程中将有较大曲率半径的部分透镜表面改为平面。考虑到激光入射角对带通滤光片输出性能的影响<sup>[11]</sup>,为使滤光片能够达到最大的工作效益,将其置于平行光路中,并在系统末端加入 APD 保护玻璃以保证实际工程应用。最后将聚焦系统中最后两块透镜胶合,这样可以降低对心难度并减少折射面,从而减少光能损失。经多次优化后的接收光学系统如图 4 所示,其中,1、2 面具有相同曲率半径,互为对称面,3、7、10 面均为平面,进一步降低了透镜加工及装配难度。

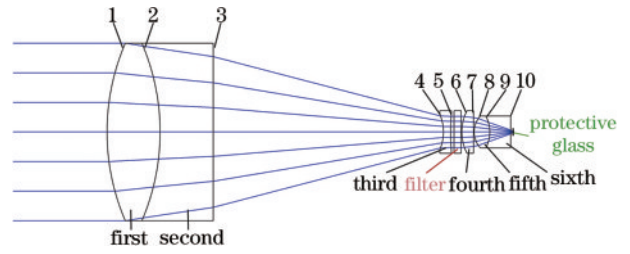


图 4 激光测距接收光学系统最终优化结构

Fig. 4 Final optimized structure of the receiving optical system for laser ranging

所提测距系统使用单个 APD 光电探测器作为接收端,属于非成像系统<sup>[8]</sup>。在进行光学系统性能评估时,可将点列图、视场内 APD 光敏面光迹图和能量集中度曲线作为评价标准,最终优化后的接收光学系统性能如图 5 所示。图 5(a)为各视场弥散斑大小,弥散斑平均半径为  $10\ \mu\text{m}$ ,视场内系统光斑质量皆为良好且能量显示集中;图 5(b)为各视场在 APD 光敏面内的光线追迹结果,视场内所有光线均能够聚焦于 APD 光敏面内,且各视场弥散斑几何尺寸远小于 APD 光敏面(直径  $500\ \mu\text{m}$ ),能够保证视场内中远距离回波能量被有效探测接收;图 5(c)为各视场能量集中度,横坐标表示包围圆的半径,最大值  $250\ \mu\text{m}$  表示 APD 的最大探测范围,当包围圆半径到达  $14\ \mu\text{m}$  时,各视场的能量集中度均可达到 90% 以上,表明回波信号进入光学系统后到达 APD 光敏面上所成光斑的能量集中度高。最终优化后的接收光学系统性能参数如表 4 所示,由式(6)可计算出系统拉格朗日不变量  $J$  为  $125\ \text{mrad}\cdot\text{mm}$ ,与表 1 中的拉格朗日不变量对比可知,系统拉格朗日不变量  $J$  的值相对较大,可保证充足的中远距离回波信号进光量。

### 3.3 公差分析

考虑实际加工需求,需对整体系统进行公差分析,且为使加工及装调过程具有一定容错,公差设置不应过于严格,使用 ZEMAX 软件进行公差分析,公差设置如表 5 所示。以聚焦于 APD 光敏面的光斑半径为基准进行 1000 次蒙特卡罗分析,分析结果如表 6 所示,结果显示视场内光斑半径相比原来增加了  $1\ \mu\text{m}$ ,而这对于激光测距接收光学系统来说,其接收端 APD 光敏面(直径  $500\ \mu\text{m}$ )对既定的容差并不敏感,即对于中远距离回波能量的接收几乎没有影响,依然能够满足探测指标要求。

## 4 杂散光抑制结构设计及分析

### 4.1 结构设计

激光测距系统常置于室外工作,在室外由于太阳光或其他光源的影响必须将滤光片工作波带范围内的杂散光考虑在内。因此为进一步提高 APD 光敏面信噪比,系统需配有抑制杂散光的光机结构。为达到杂散光抑制指标,通常在光学系统前端增加较长的遮光

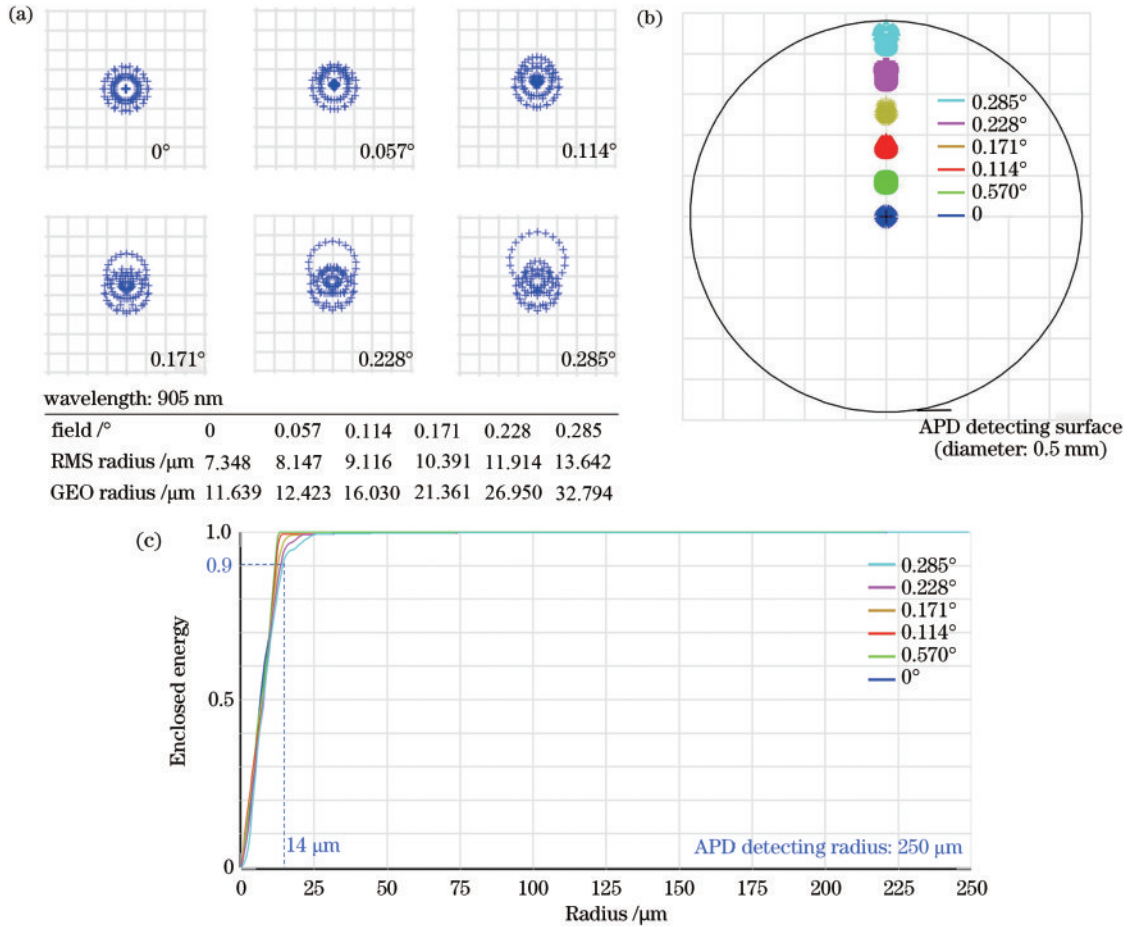


图 5 接收光学系统最终优化性能。(a)点列图;(b)视场内 APD 光敏面光迹图;(c)能量集中度曲线

Fig. 5 Final optimization performance of receiving optical system. (a) Spot diagrams; (b) footprint diagram of APD detecting surface in the view field; (c) enclosed energy curves

表 4 激光测距接收光学系统优化后的性能参数

Table 4 Performance of receiving optical system for laser ranging after optimization

Parameter	Value
Diameter of entrance pupil $D$ / mm	50
Lagrange invariant $J$ / (mrad·mm)	125
Relative aperture	1:0.9
Total length $L$ / mm	114.9
Focus spot radius / mm	0.01
Diameter of detecting surface $\Phi$ / mm	0.5

表 5 公差分析参数设置

Table 5 Parameter settings for tolerance analysis

Tolerance type	Value
Refractive index	0.0008
Thickness / mm	$\pm 0.05$
Surface irregularity per fringe	$\pm 0.5$
Abbe number / %	0.5
Surface tilt / (°)	$\pm 0.2$
Element tilt / (°)	$\pm 0.2$
Element decenter / mm	$\pm 0.05$
Test wavelength / nm	905

表 6 蒙特卡罗公差分析结果

Table 6 Results of Monte Carlo tolerance analysis

Sampling probability / %	Spot radius / μm
90	11.02894
80	10.38780
50	9.43328
10	8.50426

罩结构,但这会极大地增加系统体积<sup>[12]</sup>。采用短的外遮光罩结构以遮挡大离轴角度的杂散光,同时充分利用伽利略型系统镜筒内部空间设计挡光栅栏来抑制小离轴角度的杂散光,即利用外遮光罩与镜筒内栅栏的组合结构来实现杂散光的抑制,遮光罩与镜筒内栅栏设计原理如图 6 所示。对遮光罩来说其设计应使一定离轴角度范围内照射到其内表面的杂散光经第一次散射后不能进入系统光瞳,即以杂散光在遮光罩内部发生二次散射为基准进行设计<sup>[12]</sup>。对于镜筒来说其内部栅栏需要根据接收光学系统的具体光路进行设计,即在保证视场内光线不被遮挡的情况下设计每级栅栏,栅栏高度由边缘光路决定。

图 6(a)中, $D$ 为遮光罩入口直径, $L$ 为外遮光罩长

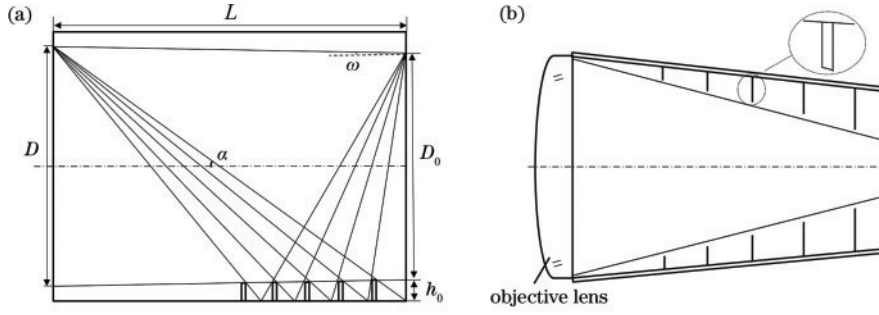


图 6 杂散光抑制结构设计原理图。(a)遮光罩设计原理图;(b)镜筒内栅栏设计原理图

Fig. 6 Schematic diagrams of the stray light suppression structure. (a) Schematic diagram of the light shield; (b) schematic diagram of the light fence in the lens barrel

度,  $\alpha$  为杂散光最小抑制角,  $\omega$  为接收光学系统半视场角,  $D_0$  为接收光学系统入瞳直径,  $h_0$  为外遮光罩第一级挡光环高度。根据图 6 中几何关系可得:

$$D = D_0 + 2L \tan \omega, \quad (10)$$

$$L = \frac{D_0 + h_0}{\tan \alpha - \tan \omega}. \quad (11)$$

根据小型化指标要求, 取外遮光罩长度  $L$  为 57 mm、 $h_0$  为 3 mm, 由式 (10)、(11) 可得,  $\alpha = 43^\circ$ 、 $D = 51$  mm。遮光罩内部挡光环的高度和间隔由工程作图法确定, 环厚度依加工难度设置为 0.5 mm。图 6(b) 中为实现

对较小离轴角度的杂散光抑制, 栅栏的级数不能太少<sup>[12]</sup>, 可取 10 级栅栏, 则各栅栏间隔可由固定的镜筒内部空间分配确定, 环厚度规定为 1 mm。综合来说, 所设计的杂光抑制结构中镜筒内栅栏针对较小离轴角即  $43^\circ$  以下的杂散光实现抑制, 而遮光罩则对较大离轴角即  $43^\circ$  以上的杂散光实现抑制, 具体有效抑制杂光的角范围需由后续杂光追迹模拟确定, 镜筒结构 1 与镜筒结构 2 (包含遮光罩及内栅栏) 如图 7 所示, 其中, 镜筒结构 2 仅在镜筒结构 1 的基础上增加了遮光罩和内栅栏。

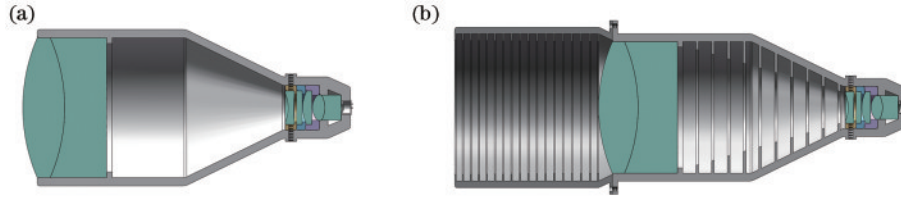


图 7 光机系统设计。(a)镜筒结构 1;(b)镜筒结构 2(包含遮光罩及内栅栏)

Fig. 7 Design of optical mechanical system. (a) Lens tube structure 1; (b) lens tube structure 2 (including light shield and inner fence)

## 4.2 杂散光抑制指标

在进行杂散光模拟追迹分析之前, 需要确定系统指标以保证上述结构符合激光测距系统工作条件, 即杂散光的抑制需达到一定水平才能够认为此结构是有效的。通常以点源透过率 ( $R_{PST}$ ) 作为系统消杂散光能力评价指标<sup>[13]</sup>, 其表达式为

$$R_{PST} = \frac{E_d(\theta)}{E_i(\theta)}, \quad (12)$$

式中:  $\theta$  为视场外杂散光离轴角;  $E_d(\theta)$ 、 $E_i(\theta)$  分别为杂光在像面上和系统入口处的辐照度。  $R_{PST}$  值越小系统对杂散光的抑制效果越好。激光测距系统中  $R_{PST}$ <sup>[13]</sup> 的表达式为

$$R_{PST} \leq \frac{P_s \cdot T \cdot s_1}{P_n \cdot R_{SN} \cdot s_2}, \quad (13)$$

式中:  $P_s$ 、 $P_n$  分别为进入系统入瞳的有效信号和杂光的光功率;  $T$  为接收光学系统透过率;  $s_1$  为光学系统入瞳面积;  $s_2$  为 APD 光敏面面积;  $R_{SN}$  为信噪比。在室外环境下, 考虑中远距离激光测距, 计算得到的  $P_n = 0.011$  W,

对于 AD500-9 型 APD, 可取系统最小可探测的信号光功率  $P_s = 7.66 \times 10^{-9}$  W。APD 探测器的  $R_{SN}$  具有一定指标, 在激光测距系统中,  $R_{SN}$ <sup>[14-17]</sup> 的表达式为

$$R_{SN} = \frac{I_{ST}}{(\bar{I}_{nb}^2 + \bar{I}_{nd}^2 + \bar{I}_{nl}^2)^{\frac{1}{2}}}, \quad (14)$$

式中:  $I_{ST}$  为接收信号经倍增后 (APD 输出) 的信号光电流;  $\bar{I}_{nb}^2$  为背景光引起的散粒噪声电流均方值;  $\bar{I}_{nd}^2$  为暗电流噪声均方值;  $\bar{I}_{nl}^2$  为热噪声电流均方值。通过 AD500-9 型 APD 参数手册与放大电路进行分析与计算, 最后计算得到的 APD 信噪比指标  $R_{SN} = 4.68$ , 接收光学系统透过率  $T = 0.7$ ,  $s_1$  与  $s_2$  之比  $\frac{s_1}{s_2} = 10^4$ 。最终所提激光测距系统杂散光抑制指标  $R_{PST} \leq 1.04 \times 10^{-3}$ 。

## 4.3 杂散光模拟追迹分析

使用 Tracepro 软件对图 7 中的镜筒结构 1 和镜筒结构 2 (包含遮光罩及内栅栏) 分别进行杂散光模拟追迹。在追迹分析之前需要确定系统参数, 包括透镜表面参



数、光机表面参数以及光源参数,表面散射分布模型采用目前较为成熟的 ABg 模型<sup>[18]</sup>,参数设置如表 7 所示。

将图 7 中镜筒结构 1 和镜筒结构 2(包含遮光罩及内栅栏)按照上述参数以 5° 为步长依次进行杂散光光线追迹分析,各离轴角度的杂散光光源都必须充满系统入口以保证接近实际应用情况,再利用式(12)计算

出它们在不同角度下分别对应的  $R_{PST}$  值,追迹结果如图 8 所示。结果显示,镜筒结构 1 只在 60°~85° 离轴角下达到了激光测距系统指标,而镜筒结构 2(包含遮光罩及内栅栏)在 20°~85° 离轴角下均能满足指标要求且效果显著,与镜筒结构 1 相比其整体杂散光抑制效果增益为 100 倍。

表 7 杂散光模拟追迹参数设置

Table 7 Parameter settings of stray light simulation tracking

Parameter	Value				
Surface parameter	Transmissivity	Absorptivity	A	B	g
Lens surface	0.95	0.002	0.00765	0.0001	1
Structure surface	0	0.8	0.00077	0.001	5
Test wavelength /nm	905				
Off-axis angle range / (°)	5-85				
Ray tracing threshold	$1 \times 10^{-9}$				
Ray tracing number	$2 \times 10^6$				

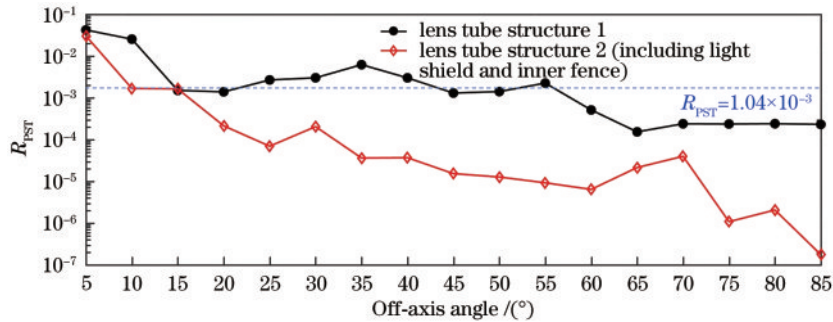


图 8 镜筒结构 1 与镜筒结构 2(包含遮光罩及内栅栏)在 5°~85° 杂散光追迹下的  $R_{PST}$  值

Fig. 8  $R_{PST}$  of lens tube structure 1 and lens tube structure 2 (including light shield and inner fence) in 5°~85° stray light tracing

### 5 实验测试和验证

为探究上述优化的接收光学系统对激光测距系统测距量程的增益效果,进行了实验测试。需要说明的是,考虑到光学系统单独开模加工成本较高,由于在市场上可直接购置具有相似参数的透镜,在保证基本特征和性能与所优化的光学系统一致的情况下对系统作了部分简化,即以相同入瞳直径(50 mm)以及视场(10 mrad)的指标规格装配了一套四片式的接收光学系统,接收光学系统总长为 105 mm,其拉格朗日不变

量同样为 125 mrad·mm,全视场平均弥散斑半径为 0.017 mm,与设计结果相差并不大,仍然能够完全满足探测指标(弥散斑半径 < 0.25 mm),遮光罩与镜筒内栅栏结构与前文保持一致。整体系统装配完成后进行通道走廊实验测试,通道全长 75 m,在近处有较亮的白炽灯背景光,经过计算得到背景光与光轴的离轴角范围为 54.2°~71.8°,在系统杂光有效抑制范围(20°~85°)内。图 9(a)为激光测距整体系统,图 9(b)为测距目标物幕布,幕布表面较为粗糙,其表面可近似等效为全扩散表面<sup>[10]</sup>,即被照射表面各方向上的光亮

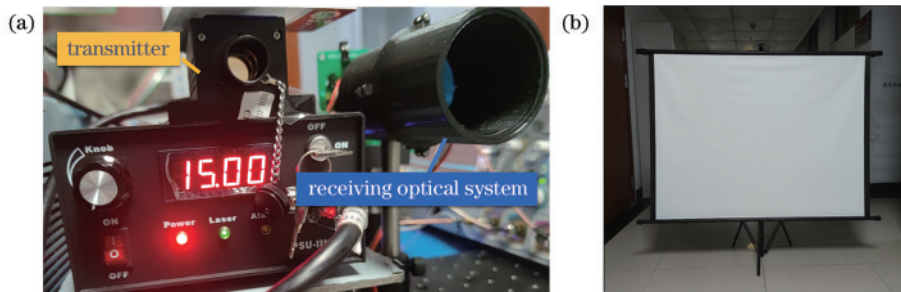


图 9 实验测试系统及目标物。(a)整体系统;(b)测距目标物

Fig. 9 Test system and target. (a) Total system; (b) ranging target

度近似一致。

激光测距系统发射端所使用脉冲激光器工作波长为 905 nm, 频率为 100 Hz, 最大峰值功率为 135 W。接收端 APD 型号为 AD500-9, 光敏面直径为 0.5 mm, 将 APD 接入跨阻电路使电流信号转化为电压信号, 通过示波器可查看回波信号电压幅值。将发射端激光器强度分别调至最小和最大挡位, 对比测试目标物在不同距离下, 仅有简易光学系统(即 APD 封装保护玻璃)和加入接收光学系统的回波信号电压幅值。测试结果

如图 10 所示: 在仅有简易光学系统的情况下, 回波信号电压幅值随着距离的增加而迅速下降, 在目标物距离系统约 15~20 m 处便淹没在噪声中; 加入接收光学系统后, 在距离 7 m 处的回波信号电压幅值达到峰值, 此现象可由几何重叠因子的概念来解释, 即在此距离处发射端束散场与接收端视场进入完全重叠区<sup>[19]</sup>, 随着目标物距离的增加回波信号幅值缓慢下降, 直至目标物位于室外通道末端即距离 75 m 处回波信号仍有较大的幅值。

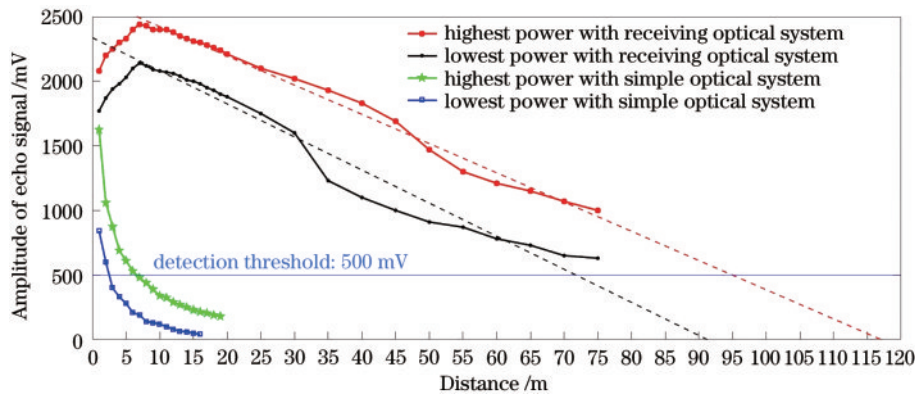


图 10 不同情况下激光测距系统在各个距离的回波信号幅值

Fig. 10 Echo signal amplitude of laser ranging system at various distances under different conditions

所提激光测距系统使用的时刻鉴别方法为阈值比较法<sup>[6]</sup>, 考虑室外较大的噪声波动, 为保证测距的精度和稳定性将阈值设置为 500 mV, 即低于此阈值的回波信号将视为无效信号。通过图 10 所示线性拟合保守推测加入接收光学系统后 75 m 以外测距距离所对应的回波信号电压幅值, 进而得到测距系统在最大和最小发射功率挡位下的测程分别为 95 m 和 72.5 m。而仅有简易光学系统时, 测距系统在最大和最小发射功率挡位下的测程分别为 6.5 m 和 2.5 m。将两种情况的系统测程结果作商然后求平均值可知, 在接收光学系统的拉格朗日不变量  $J$  为 125 mrad·mm 的前提下, 加入接收光学系统后的激光测距系统测距量程相比仅有简易光学系统的提升了 21 倍。为体现其增益效果, 还设置了口径为 25 mm 的单透镜与三片式系统作为实验对照组, 它们的弥散斑半径分别为 558  $\mu\text{m}$  与 46  $\mu\text{m}$ , 相同的测试条件下它们的量程增益分别为 2.6 倍与 4.8 倍, 说明弥散斑过大时不利于量程增益。而所提接收光学系统得益于同时具有较大口径(50 mm)和较小的像差(弥散斑半径 17  $\mu\text{m}$ ), 从而实现了更佳量程增益效果(21 倍)。

## 6 结 论

基于拉格朗日不变量理论分析设计了一种大相对孔径接收光学系统, 系统采用 6 片式伽利略型标准球面镜, 可满足低制造成本指标, 优化后光学系统性能良好, 整体结构紧凑, 在保证充足进光量同时其总长也可

满足小型化指标。通过杂散光模拟追迹可知, 所设计的遮光罩及镜筒栅栏结构在  $20^\circ \sim 85^\circ$  离轴角视场外的杂散光抑制满足激光测距系统指标。实验结果表明, 在接收光学系统拉格朗日不变量  $J$  为 125 mrad·mm 的前提下, 激光测距系统的测距量程在加入光学系统后可提升 21 倍。鉴于实际装配过程中存在的误差, 再加上目标物表面粗糙度对回波信号幅值的影响, 所提接收光学系统对于激光测距量程的增益仍具有一定探索性, 具有较大的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 王一帆, 徐欣, 谈宜东. 激光精密测距技术进展[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(6): 22-33.  
Wang Y F, Xu X, Tan Y D. Laser precision ranging technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2021, 42(6): 22-33.
- [2] 邵禹, 王德江, 张迪, 等. 单光子激光测距技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011020.  
Shao Y, Wang D J, Zhang D, et al. Research progress of single photon laser ranging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011020.
- [3] 张乐. 激光雷达发射和接收光学系统研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2004: 39-51.  
Zhang L. Study on emitting and receiving optical systems of lidar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004: 39-51.
- [4] 肖宇刚. 激光测距瞄准镜光学系统设计研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014: 15-41.  
Xiao Y G. Design and research on optical system of laser-



- ranging sight[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014: 15-41.
- [5] 魏健. 基于 ZEMAX 手持激光测距望远镜光学系统设计[D]. 杭州: 中国计量大学, 2016: 36-40.  
Wei J. Optical system design of laser range finder based on ZEMAX[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2016: 36-40.
- [6] 翟云. 脉冲式激光测距望远镜设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2018: 15-37.  
Zhai Y. Design of pulse laser ranging telescope[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018: 15-37.
- [7] 季云飞, 谢桂娟. 基于卡塞格林系统的激光测距接收光学系统的设计[J]. 激光与红外, 2019, 49(9): 1114-1118.  
Ji Y F, Xie G J. Design of laser rangefinder receiving optical system based on Cassegrain system[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(9): 1114-1118.
- [8] 潘俊旭, 谢洪波, 马骏, 等. 用于激光测距的小 F 数接收光学系统设计[J]. 应用光学, 2020, 41(1): 18-23.  
Pan J X, Xie H B, Ma J, et al. Design of small F-number receiving optical system for laser ranging[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(1): 18-23.
- [9] 薛鸣球. 关于拉氏不变量[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1982, 5(4): 1-5.  
Xue M Q. On Laplace invariants[J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1982, 5(4): 1-5.
- [10] 李林, 黄一帆. 应用光学[M]. 5 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2017: 59-61, 153-155.  
Li L, Huang Y F. Applied optics[M]. 5th ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2017: 59-61, 153-155.
- [11] 邵碧波, 王平, 卢嘉春, 等. 激光入射角对干涉带通滤光片输出性能的影响[J]. 光谱实验室, 2009, 26(6): 1457-1460.  
Shao B B, Wang P, Lu J C, et al. Influence of laser incidence angle on transmission characteristics of bandpass multilayer thin-film filters[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2009, 26(6): 1457-1460.
- [12] 王虎, 陈钦芳, 马占鹏, 等. 杂散光抑制与评估技术发展及展望(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(7): 0751406.  
Wang H, Chen Q F, Ma Z P, et al. Development and prospect of stray light suppression and evaluation technology(invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(7): 0751406.
- [13] 舒星星. 可见光光学系统杂光分析及抑制[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2015: 8-12.  
Shu X X. Analysis and suppression of stray light in visible light optical system[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2015: 8-12.
- [14] 刘晓波, 李丽, 任照明. 闪光雷达中 APD 探测性能分析[J]. 航空科学技术, 2009, 20(3): 42-44.  
Liu X B, Li L, Ren Z M. Performance analysis of APD in flash radar system[J]. Aeronautical Science and Technology, 2009, 20(3): 42-44.
- [15] 薛莉, 翟东升, 李祝莲, 等. 激光测距中 APD 阵列探测信噪比分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(3): 101-108.  
Xue L, Zhai D S, Li Z L, et al. Signal-to-noise ratio analysis on APD arrays in laser ranging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(3): 101-108.
- [16] 穆永吉, 李蕊, 万渊, 等. 星载激光雷达系统杂散光分析与抑制[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0510005.  
Mu Y J, Li R, Wan Y, et al. Stray light analysis and suppression for spaceborne lidar system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0510005.
- [17] 贺红雨, 孙建锋, 卢智勇, 等. 基于载波相位调制的相位式激光测距外场实验[J]. 中国激光, 2021, 48(24): 2404001.  
He H Y, Sun J F, Lu Z Y, et al. Outdoor experiments of phase-shift laser range finder technique based on optical carrier phase modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(24): 2404001.
- [18] 马博伦, 田爱玲, 王红军, 等. 卫星光通信系统中金属结构件的表面散射特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(1): 0106006.  
Ma B L, Tian A L, Wang H J, et al. Research of surface scattering characteristics of metal structures in satellite optical communication system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(1): 0106006.
- [19] 戴丽莉, 丁红星, 孙东松. 离轴激光雷达几何重叠因子的计算与实验测定[J]. 半导体光电, 2008, 29(6): 980-983, 987.  
Dai L L, Ding H X, Sun D S. Calculation of geometric overlap factors in abaxial diode pumping lidar[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2008, 29(6): 980-983, 987.